

Luftverunreinigungen und Waldschäden

E. J. GÄRTNER

Hessische Forstliche Versuchsanstalt, Hann.Münden

Industrialisierung ist stets mit steigendem Energieverbrauch und zunehmenden Transportleistungen verbunden. Auch heute noch sind fossile Brennstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle die wichtigsten Energiequellen. Bei ihrer Verbrennung entstehen neben Kohlendioxid in nicht unerheblichem Umfang Stickstoffoxide und Schwefeldioxid. Sie wirken ebenso wie der teilweise als Folgeprodukt der Stickstoffoxidemission entstehende Ozon in höheren Konzentrationen unmittelbar pflanzenschädigend. Stickstoffoxide und Schwefeldioxid führen aber auch durch Deposition als Nitrat und Sulfat zum erhöhten Eintrag von starken Mineralsäuren in die Waldböden.

Während der 70er Jahre mehrten sich die Nachweise ungewöhnlich niedriger pH-Werte in den Seen Skandinaviens und des nordöstlichen Nordamerikas. Um 1980 wurden auch in Deutschland Veränderungen in den Wäldern sichtbar, die

- (a) nicht einer bestimmten Ursache zugeordnet werden konnten;
- (b) unabhängig vom Grundgestein auf großer Fläche bei vielen Baumarten auftraten und
- (c) so deutlich waren, daß sie durch einfache Beobachtungen festgestellt werden konnten.

Diese Erscheinung wurde bald unter dem Schlagwort "Waldsterben" bekannt. Heute ist der Ausdruck "Neuartige Waldschäden" dafür gebräuchlich.

Der heutige Stand des Wissens wurde vom Forschungsbeirat Waldschäden/Luftverunreinigungen der Bundesregierung und der Länder 1990 dahingehend zusammengefaßt, daß die neuartigen Waldschäden auf ein Ursachenkomplex aus abiotischen und biotischen Faktoren zurückgehen. Anthropogene Luftverunreinigungen aus Industrieanlagen, Kraftwerken, Verkehr, Haushalt und Landwirtschaft spielen dabei eine Schlüsselrolle.

Das Land Hessen begann 1982 das interdisziplinäre Untersuchungsprogramm "Waldbelastungen durch Immissionen (WdI) - Waldökosystem-studie Hessen". Es wird gemeinsam getragen von der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt,

Tabelle 1
Konzentration von Luftschadstoffen und ihre Deposition im Freiland und unter Fichte in Hessen (WdI-Hauptmeßstationen, ab 1984)

Meßstation	Luft			
	Konzentrationen Jahresmittelwert μm^3			
	SO ₂	NO ₂	NO	O ₃
Witzenhausen (1)	45	16	3	81
Frankenberg (2)	38	14	4	87
Grebenau (3)	42	20	4	91
Spessart (4)	35	20	3	88
Königstein (5)	26	29	7	77
Fürth/Od. (6)	28	29	4	89
Grenzwerte (7)	20	20*	-	50**

Meßstation	Niederschlag (JMW) mm	Deposition in Freiland, kg ha ⁻¹ a ⁻¹			
		SO ₄ -S	NO ₃ -N	NH ₄ -N	H ⁺
1.	930	19,4	8,5	7,2	0,7
2.	848	14,6	6,8	4,0	0,4
3.	694	13,1	5,3	3,5	0,5
4.	964	19,0	8,7	6,1	0,6
5.	870	16,2	6,8	4,3	0,6
6.	1203	21,0	9,7	6,4	0,7
7.	-	-	-	-	0,5++

Meßstation	Niederschlag (JMW) mm	Deposition unter Fichte in Hessen, kg ha ⁻¹ a ⁻¹			
		SO ₄ -S	NO ₃ -N	NH ₄ -N	H ⁺
1.	685	62,3	18,1	11,9	2,2
2.	550	38,4	11,4	7,4	1,0
3.	390	39,9	9,8	16,3	1,1
4.	673	36,8	13,0	6,8	1,1
5.	594	49,0	17,4	10,6	1,8
6.	797	46,1	19,3	13,4	1,3
7.	-	-	-	-	0,5++

H⁺: freie Protonen; * Jahresmittelwert bei gleichz. erreich. Grenzwert SO₂ und O₃; ** Mittelwert 9.00-16.00, April-September; ++ Neutralisationsfähigkeit der Waldböden durch Gesteinsverwitterung

Hessischen Landesanstalt für Umwelt, Hessischen Landwirtschaftlichen Versuchsanstalt und Hessischen Forsteinrichtungsanstalt. Darüber hinaus arbeiten zahlreiche universitäre und private Forschungseinrichtungen in diesem Programm mit.

Ziel dieses Programmes sind Beiträge zur Klärung der Fragen zu leisten,

(a) wie die räumliche Verteilung der Waldschäden und ihre zeitliche Entwicklung ist und,

(b) was die Ursachen dieser Erscheinungen sind.

Für die erste Fragestellung wurden rund 700 Erhebungspunkte in allen Wäldern Hessens systematisch eingerichtet. Für die zweite Fragestellung wurden sechs nahezu gleichmäßig über das Land Hessen verteilte Hauptmeßstationen aufgebaut.

In Tabelle 1 sind die Jahresmittelwerte für die Konzentrationen von Luftschadstoffen und ihre Deposition im Bestandesniederschlag der Fichte von den 6 WdI-Hauptmeßstationen zusammengestellt. Wegen des schrittweisen Aufbaues der Meßstationen gehen die dargestellten Jahresmittelwerte auf Meßperioden zwischen 3 und 6 Jahren zurück. Tabelle 2 zeigt Vergleichswerte für den Freilandniederschlag in der nördlichen gemäßigten Zone. Die wichtigsten Aussagen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Konzentrationen der Luftschadstoffe überschreiten in Hessen an allen mitten im Wald gelegenen Meßstationen teilweise erheblich die kritischen Grenz-

Tabelle 2

Freiland-Deposition in der nördlichen gemäßigten Zone ($\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)

Region	H^+	$\text{SO}_4\text{-S}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$
West-Europa (Spanien, Frankreich, Großbritannien, Belgien, Niederlande)	0,17 - 1,29	7,3 - 16,8	2,7 - 7,6	3,1 - 14,4
Nord-Europa (Norwegen, Schweden, Finnland)	0,18 - 0,42	6,6 - 10,2	2,1 - 4,3	2,7 - 3,4
Mittel-Europa (Deutschland, Schweiz, Österreich)	0,09 - 0,47	11,3 - 30,7	5,3 - 6,3	7,1 - 8,3
Ost-Europa (Ungarn)	0,05	17,2	4,9	9,7
Nordöstl. USA/Südöstl. Kanada		8,3 - 14,3	3,4 - 6,6	
Hessen	0,4 - 0,70	13,1 - 21,0	5,3 - 9,7	3,5 - 7,2

werte für Waldbestände. Direkte Schäden an Blättern und Nadeln sind daher anzunehmen, auch wenn sie nicht unmittelbar sichtbar sind.

- Die für das Ökosystem Wald entscheidende Deposition starker Säurebildner beträgt im Bestandesniederschlag unter Fichte durch die abfangende und auskämmende Wirkung der Baumkronen das 1,5- bis 3-fache der Deposition auf den unmittelbar benachbarten Freilandmeßstellen.

- Die Deposition freier Wasserstoffionen im Bestandesniederschlag unter Fichte übersteigt die langfristige Pufferkapazität der Waldböden durch Gesteinsverwitterung um das 2- bis 6-fache. Die gesamte Säurebelastung durch die nach Umsetzungen zusätzlich wirkenden Einträge von Basen (Kationensäuren) liegen um mehr als 50 % höher.

- Die Einträge von Stickstoff überschreiten an allen Meßstationen erheblich die für Wälder kritische Grenze von $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

- Im Vergleich zu anderen Gebieten liegt in Hessen die Deposition von freien Protonen (H^+) an der Spitze, die von Sulfat-Schwefel sowie Nitrat- und Ammonium-Stickstoff stets im oberen Bereich der Referenzwerte. Hessen zählt damit zu den stark belasteten Gebieten.

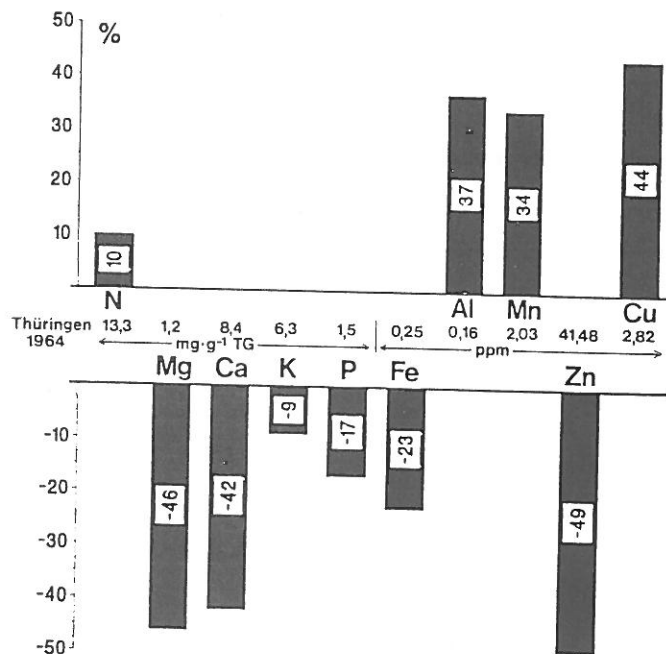


Abbildung 1

Veränderung Nadelelementgehalte mittelalter Fichten 1964-1983.
Buntsandsteingebiet Thüringen (1964)/Hessen (1983). 7 Quirl, 2. Nadeljahrgang

Die Depositionen dieser Säurebildner übersteigt seit Beginn der industriellen Entwicklung in Deutschland vor etwa 100 Jahren zunehmend die natürliche Pufferkapazität der Waldböden erheblich. Damit hat im letzten Jahrhundert eine so beträchtliche Säuredeposition in den Waldböden stattgefunden, daß tiefgreifende Veränderungen/Schädigungen der Waldökosysteme unausbleiblich sind. Sie sind vor allem durch einen erheblichen Verlust (Auswaschung) der wichtigsten basischen Pflanzennährstoffe Calcium und Magnesium gekennzeichnet.

Die jeweilige Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen im Boden kommt durch die Nadel- oder Blattgehalte der Bäume zuverlässig zum Ausdruck. Die Veränderungen im Ernährungszustand mittelalter Fichten zeigt ein Vergleich der Nadelelementgehalte in dem im Herzen Deutschlands liegenden Buntsandsteingebiet von Thüringen und Hessen. Abbildung 1 zeigt, daß innerhalb der letzten 20 Jahre unter vergleichbaren ökologischen Bedingungen

- die Nadelgehalte von Magnesium, Calcium und Zink um 40-50 % gesunken sind und bereits vor nunmehr 8 Jahren im Bereich der Unterversorgung lagen,
- die Nadelgehalte von Kupfer, Aluminium und Mangan um 35-45 % angestiegen waren und
- sich die Nadelgehalte von Stickstoff gegenüber dem bereits deutlich erhöhten Bezugswert von $1,33 \mu\text{g g}^{-1}$ Trockensubstanz (TS) zwischen 1964 und 1983 um 10 % erhöht haben.

Diese Nadelgehalte lassen ein klares Ungleichgewicht zwischen den wichtigsten Pflanzennährstoffen erkennen, wobei die Verbesserung der Stickstoffversorgung durch die hohen Depositionseinträge durchaus von Bedeutung ist.

Für die Erfassung der räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Waldbestände wurden Mitte der 80er Jahre im westlichen Deutschland, der Europäischen Gemeinschaften (EG) und auch der Mitgliedstaaten der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (ECE) einheitliche Erhebungsrichtlinien eingeführt, die zu weitgehend vergleichbaren Ergebnissen führten. Die Waldschadenserhebungen bauen derzeit auf der Erfassung von Blatt-/Nadelverlust und Vergilbung auf, da diese Merkmale großräumig schnell und reproduzierbar erfaßt werden können. Die Erhebung von aussagefähigeren Einzelmerkmalen für besondere Einzelschadursachen muß wegen des großen Arbeitsaufwandes auf eine begrenzte Zahl sogenannter "Dauerbeobachtungsflächen" begrenzt bleiben.

Die entscheidende Aussage von Abbildung 2 ist, daß für große Waldflächen Mitteleuropas derzeit vor allem in den über 60jährigen Beständen von einer stetigen Abnahme der voll belaubten oder benadelten Bäume ausgegangen werden muß. Die Versorgung der Assimilationsorgane eines Baumes mit Wasser und Nährstoffen muß nahezu ausschließlich durch die Feinwurzeln erfolgen. Durch die großflächige starke Säurebelastung der Waldböden ist während der letzten Jahrzehnte auf erheblichen Flächen eine fortschreitende Bodenversauerung eingetreten. In zunehmendem Maße werden Schädigungen des Feinwurzelsystems der Bäume und eine damit verbundene Verringerung ihrer Effektivität für Wasser- und Nährstoffversorgung deutlich. In Verbindung mit dem Auftreten von Luftschadstoffen in der Atmosphäre oberhalb der für Waldbäume kritischen Grenzen

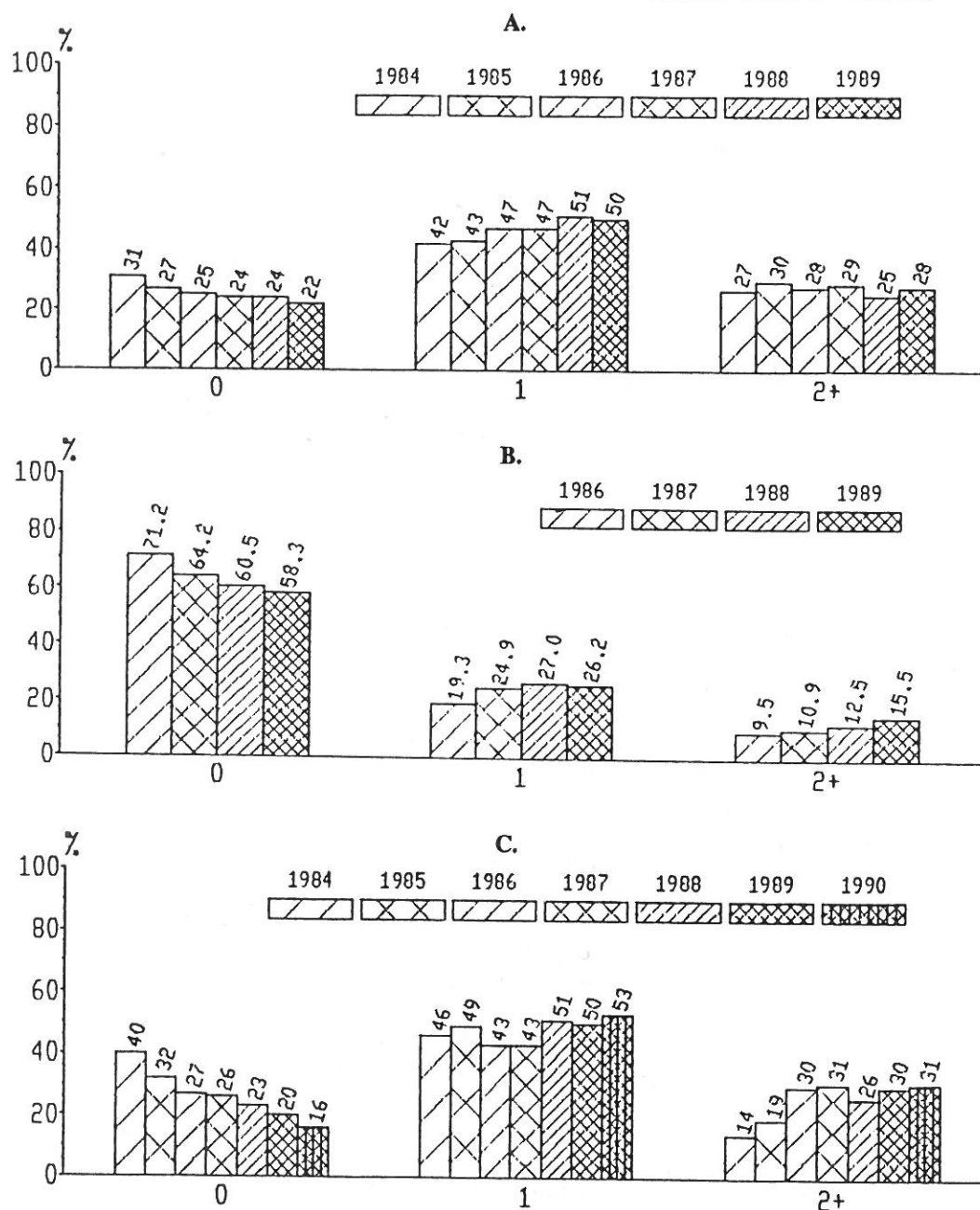


Abbildung 2

A. Europa, 1986-1989. B. Deutschland, West, 1984-1989. C. Hessen, 1984-1990.
 (Alle Baumarten, über 60 Jahre). Blatt-/Nadelverlust (%): 0: 0-10; 1: 11-25; 2+: 26
 und mehr

ist damit offensichtlich eine Anpassung der Bäume an die durch Luftverunreinigungen sich verändernde Lebensbedingungen erforderlich. Sie wird vor allem durch eine allmähliche Verminderung der Blatt- und Nadelmasse je Baum deutlich. Verbunden mit den Schädigungen von Feinwurzeln der Bäume, Bodenfauna und Boden ergibt sich eine zunehmende Instabilisierung der Waldökosysteme.

Literatur

- BALÁZS, A., 1991. Nierderschlagsdeposition in Waldgebieten des Landes Hessen - Ergebnisse von den Meßstationen der "Waldökosystemstudie Hessen". Forschungsberichte der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt. Bd. 11.
- BRECHTEL, H. M., 1991. Impact of Acid Deposition Caused by Air Pollution in Central Europe. Poster, First European Symposium on Terrestrial Ecosystems: Forests and Woodlands, Florence.
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1990: Waldzustandsbericht - Ergebnisse der Waldschadenserhebung 1989. Schriftenreihe des Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Heft 381.
- GÄRTNER, E. J. et al., 1990. Die Nadelverluste mittelalter Fichten (*Picea abies* (L. Karst.) in Hessen in Abhängigkeit von Nadelinhaltsstoffen, Bodenelementgehalten und Standortsfaktoren. Forschungsberichte der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt. Bd. 10.
- Hessisches Ministerium für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz, 1990: Waldschäden weiter leicht gestiegen. Mitt. der Hessischen Landesforstverwaltung. FORST INTERN. No. 102.
- HOFMANN, W. & MÜLLER, W., 1971. Beiträge zur Erforschung der Koniferenstandorte im Thüringer Buntsandsteingebiet. Diss. der Technischen Universität Dresden, Sektion Forstwirtschaft.
- International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests, 1990. The 1989 Forest Damage Survey in Europe. Executive Summary.
- NAPAP - National Acid Precipitation Assessment Program, 1990: Integrated Assesment, External Review Draft Questions 1 and 2, 3, 4 & 5.
- Task Force on Mapping of the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, 1990: Draft Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads.